論 文

木材の腐朽と根系効果を考慮したのり緑化工の安定性評価
－丸太筋工を用いたのり面緑化工を例として－

今井　久 *1・池田　穣 *2・柴田直明 *3

木材の有効利用は国内資源の有効活用や温暖化対策など環境保全に不可欠である。そのためには木材の特性を活かした利用法やその性能を定量的に提示する必要がある。本報告では丸太筋工を用いた樹木によるのり面緑化工を例に，丸太の腐朽と根系の有するせん断抵抗力の経時変化を実測値に基づきモデル化し，緑化に用いた客土の安定性の遷移の例により安定性評価手法を提示した。

キーワード：木材利用，のり面の安定，緑化，樹木，根系

1. はじめに

国産木材の有効利用は，温暖化対策，森林機能の保全や国土の有効利用など [1]，多くの効果が望まれ，その必要性が叫ばれ続けているが顕著な利用量の増加が少ないのが現状である。この原因として，木材の腐朽，コスト，材の不均質性，設計事例の少なさなどがある。これに対し本報では，丸太筋工として木材をのり面緑化工に適用した場合を想定し，木材の腐朽性と根系成長効果を利用した定量的評価事例を提示する。

のり面の緑化では，従来，草本類による緑化がなされていたが最近では木本類による緑化が採用されている。例えば，建設中の圏央道や北関東道の盛土のり面（**写真－１**）に見られる。木本類による緑化は景観・環境保全の観点と共に大気中の二酸化炭素が吸収・貯蔵され，温暖化対策としての効果も期待される。一方，木本類による緑化は草本類に比べ成長が遅くのり面の施工初期においてのり面侵食の懸念がある。これに対して，施工の初期においては丸太にてのり面を安定化し，丸太腐朽後は木本根系にて安定化を図る方法が考えられる。本報では治山に用いられる丸太筋工を利用した木本類によるのり面緑化を想定し，使用される丸太の腐朽と木本類根系の成長を考慮したのり面表層部安定の経過年数に伴う変遷に関する検討結果について報告する。

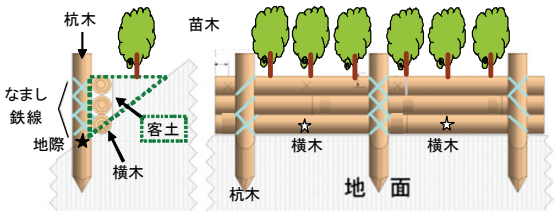
2. 丸太筋工

丸太筋工 [1]は，治山工事で崩壊した山腹に間伐材等の丸太や円柱加工材を柵状に配置し，棚部には樹木の苗木が植えられ，斜面表土の流出防止を図り，早期に植生回復をはかる工法（**図－１**，**写真－２**）である。時間の経過と共に，丸太は腐朽，樹木など植生は生長し，自然に還元されるため環境にも優しい工法とされる。

丸太筋工には客土部分（**図－１**左：断面の三角形で示す）の荷重を保持する機能が求められ，杭木はその地際におけるせん断抵抗力（**図－１**左★印），横木は梁としての曲げ強度（**図－１**右☆印）が要求される。杭木や横

写真－１　道路盛土のり面の木本類（北関東道）

写真－２　丸太筋工



図－１　丸太筋工の概要図

*1 原子力部　*2 環境部　*3 長野県林業総合センター

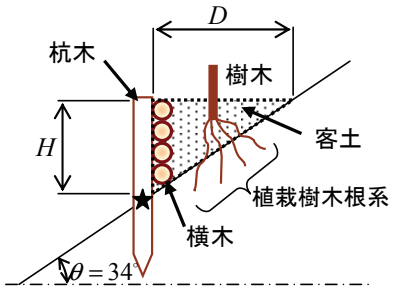
木は時間の経過とともに腐朽し，徐々にせん断抵抗力，曲げ強度が小さくなり丸太筋工の支持機能が低下する。一方，客土部に移植された苗木は成長し，その根系は客土部に広がり客土部を繊維補強に類して一体化するとともに地山部にも伸張し，客土と地山を縫い付ける。地山に侵入した根系は客土の滑動に対してせん断抵抗力を発揮し丸太筋工の負担を軽減する。

本報では，丸太筋工（杭木･横木）の腐朽による強度低下と，根系成長によるせん断抵抗力増加による荷重減少を考慮した客土部分の安定性の遷移を評価する。

3. 想定した丸太筋工と安定性評価

3.1 想定した丸太筋工

のり面（勾配 1:1.5，34 度）に使用した丸太筋工を想定し，丸太筋工の腐朽劣化と植生根系による客土の安定性を検討する。**表－１**に想定した斜面と丸太筋工の基本諸元を示す。**図－２**に想定した丸太筋工の断面を示す。ここでは径 120mm の丸太を利用し，横木 4 本，杭木間隔を L=1.8m とし，杭木の間には，**図－１**に示すように 3 本の苗木が植えられているとした。



図－２　仮想した丸太筋工断面

3.2 丸太筋工に作用する荷重

客土には**図－３**に示すように重力による自重，底面における垂直反力とせん断抵抗力，丸太筋工の横木からの反力が作用する。斜面勾配を θ，小段の高さを H，杭間隔 L，重力加速度 g，小段に充填される客土の飽和密度を ρ_{sat} とすると客土部分の重量 W は次式で与えられ，

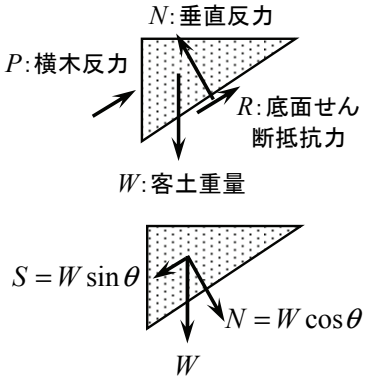
$$W = \frac{1}{2}\rho_{sat} gDHL = \frac{1}{2\tan\theta}\rho_{sat} gLH^2 \qquad (1)$$

斜面方向に客土を滑動させようとする自重による力（滑動力）S は次式となる。

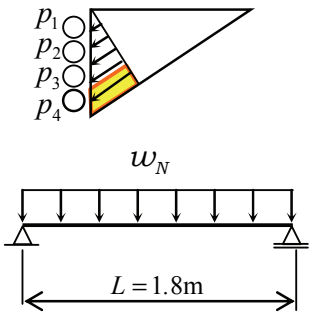
$$\begin{aligned} S &= W\sin\theta - R \\ &= \frac{\sin\theta}{2\tan\theta}\rho_{sat} gLH^2 - R \\ &= \frac{\cos\theta}{2}\rho_{sat} gLH^2 - R \end{aligned} \qquad (2)$$

R は底面せん断抵抗力で，客土と地山斜面との摩擦力と根系によるせん断抵抗力により構成される。なお降水に伴い摩擦抵抗や摩擦面に作用する垂直応力の減少の可能性から摩擦力は無視することとする。したがって，底面せん断抵抗力は，根系によるせん断抵抗力となり，根系の成長に依存する。根系のせん断抵抗力やその成長については後述する。

客土安定のためには杭材の地際部にはこの滑動力 S に対するせん断抵抗力が要求される。横木にはこの滑動力 S が土圧として作用し，**図－４**に示すように深度に比例した土圧分布が想定され，最下部の横木に最も大きな土



図－３　客土に作用する力



図－４　横木に作用する土圧と単純梁のモデル化

表－１　想定した斜面と丸太筋工の基本諸元

項目	斜面勾配	小段の高さ	小段の奥行き	客土の飽和密度	杭間隔	横木本数	丸太径	曲げ許容応力度	せん断許容応力度
記号	θ	H	B	ρ_{sat}	L	n	D	σ_b	σ_s
単位	DEG	m	m	Mg/m^3	m	本	mm	MPa	MPa
値	34	0.48	0.72	1.5	1.8	4	120	5.7	0.5

圧に抗する性能が要求される。横木は杭体を支点とする単純梁（**図－４**）と考えられる。この単純梁に作用する等分布荷重ω_Nは，横木の本数を N（本例では N=4），最下部の横木に作用する荷重をP_Nとすると次式となる。

$$w_N = \frac{P_N}{L} = \frac{(2N-1)}{N^2}\frac{S}{L} \qquad (3)$$

支間中央における曲げモーメントの大きさMは次式となる。

$$M = \frac{w_N L^2}{8} = \frac{(2N-1)SL}{8N^2} = \frac{7SL}{128} \qquad (4)$$

3.3　安定性評価

安定性とは客土の滑動に対する抵抗能力のことで，①丸太筋工の杭木が滑動力に対して十分なせん断抵抗力を有すること，②横木の最下段の材中央において十分な曲げ強度を有すること，の２点を確認することが必要となる。

①杭木においては，杭木丸太の健全部の面積 Ae に健全部のせん断許容応力度σ_sを乗じた杭木丸太の有するせん断強度が滑動力よりも大きいことを確認することである。この関係は(2)式を用いて次のように示される。すなわち，杭木の有するせん断強度と根系のせん断抵抗力の和が客土重量の滑動方向成分よりも大きいことを確認することを意味する。

$$A_e\sigma_s + R > W\sin\theta \qquad (5)$$

②横木においては，横木丸太の健全部の断面係数Zに横木丸太の曲げ応力度σ_bを乗じた横木丸太の有する曲げ強度が滑動力による曲げモーメントよりも大きいことを確認する。この関係は(2)(4)式を用いて次のように示される。

$$Z\sigma_b > \frac{7LS}{128} = \frac{7L}{128}(W\sin\theta - R) \qquad (6)$$

右辺第二項を左辺に移項すると次式となり，横木の有する曲げ強度と根系のせん断抵抗力による横木に作用する荷重低減による曲げモーメントの和が客土重量による荷重のもたらす曲げモーメントよりも大きいことを確認することを意味する。

$$Z\sigma_b + \frac{7LR}{128} > \frac{7L}{128}W\sin\theta \qquad (7)$$

ここで，(5)式に示す杭木丸太の健全部の面積 A_e，(6)（7)式に示す横木丸太の健全部の断面係数 Z は，初期の丸太直径 D_0と，その時点での腐朽厚さを t_dとするとそれぞれ次式で与えられる。

$$A_e = \frac{\pi(D_0 - t_d)^2}{4} \qquad (8)$$

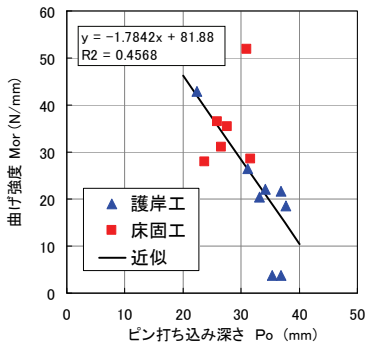
$$Z = \frac{\pi(D_0 - t_d)^3}{32} \qquad (9)$$

したがって，(5)式，(7)式にて安定性を評価するためには丸太の腐朽厚さの変遷ないし腐朽速度および成長に伴う根系によるせん断抵抗力を把握する必要がある。腐朽速度に関しては第４章で，根系のせん断抵抗力に関しては第５章にて示す。

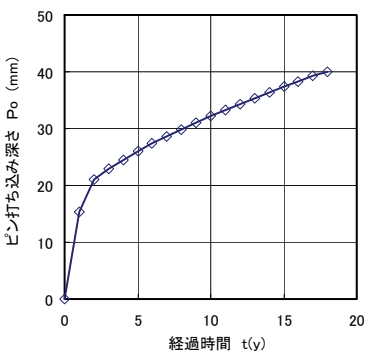
4.　丸太の腐朽速度

石川[4]は木製護岸工に用いられている丸太を対象にピロディン試験と曲げ試験を実施し，ピン打ち込み深さ（ピロディン試験値）と曲げ強度の関係を整理し（**図－５**），ピン打ち込み深さが深いほど曲げ強度が低下することと，この両者は**図－５**に示される関係式で評価しうることを示した。さらに，この試験結果に加えて曲げ強度と断面係数の関係より丸太の腐朽厚さを推定し，丸太の腐朽速度は 2～5mm/y であることを示した。

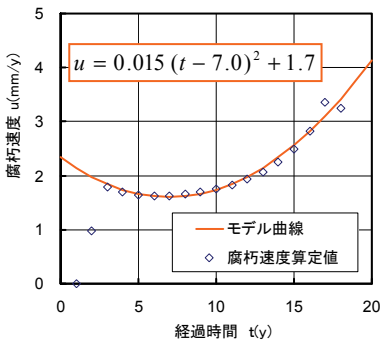
吉野[3]らは丸太筋工のピロディン試験により丸太の経



図－５　ピン打ち込み深さと曲げ強度



図－６　ピン打ち込み深さの経時変化



図－７　腐朽速度の経時変化

年変化を調査し，経過時間とピン打ち込み深さの関係の評価方法を提案している。この提案に際して提示された経過時間とピン打ち込み深さのデータを整理すると**図－６**に示す関係が得られる。

図－５，**図－６**の関係より，経過時間と曲げ強度，さらには石川の提示する考え方を適用して経過時間と腐朽深さの関係に整理し，**図－７**に示す２次関数のモデル曲線とした。このモデル曲線は初期の３年間ほどは調査・試験結果に基づく腐朽速度よりも大きな値を与えるが，設計的観点からは保守的であり，また，丸太では辺材の腐朽が速く進む傾向を考えるとむしろ妥当であると考えられる。この整理結果からは初期の 20 年間における腐朽速度は 2～4mm/y 程度となる。

5. 根系のせん断抵抗力と成長速度

根系のせん断抵抗力 R はせん断面の存在する根系の引き抜き抵抗力より(10)式で与えられることが北原[6]により示されている。この式はせん断面に存在する根系の引き抜き抵抗力 T の合計に補正値を乗じるもので，f_Rは降雨による引き抜き抵抗力の低減を考慮した補正係数[6]でおよそ 0.7，k は根系の引き抜き方向に対する補正係数で平均的[7]に k=1.12 とされる。

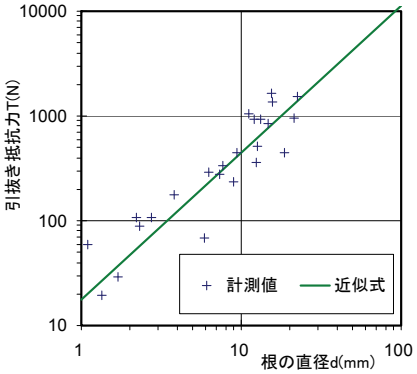
$$R = f_R k \sum T_i \qquad (10)$$

根系の引き抜き抵抗力 T は，原位置における引き抜き試験結果[5]より**図－８**に示す根の直径との関係より推定可能である。この引き抜き試験は植栽から 12 年経過時点の苗木を対象に実施されたもので，**表－２**はこの試験実施時に記録した対象樹木の根の本数，直径等を示している。この表より，1 本の樹木に平均約 5 本の根系が地山まで伸張し，根系の直径は平均 9.6mm であることが示される。初期の直径を 0mm とし，一定速度で成長すると仮定すると年間 0.8mm のペースで直径は増加することとなる。引き抜き試験と同時に 12 年経過時の樹木の生存率も調査され，結果として約 50%という数字が提示[8]された。

同時期にほぼ同じ成長状態の苗木を植え，各苗木が同様に成長，あるいは枯死し，同じ寸法の根系が成長すると仮定すると，対象範囲内の根系のせん断抵抗力 R は(10)式をもとに次式で表わされる。

$$R = f_R k(n_r n_T p_L T) \qquad (11)$$

ここで，n_r：１本の樹木からの根系本数（=5），n_T：植えられた苗木本数（=3），p_L：生存率（=0.5）を示し，カッコ内は本検討に適用する値である。



図－８　根の直径と引抜き抵抗力

6. 丸太の腐朽と根系成長を考慮した安定性計算の結果

杭木の安定性評価では，(5)式に示される，①杭木の木材強度によるせん断抵抗力（腐朽に伴い時間経過に伴い低減），②根系によるせん断抵抗力（根系の成長に伴い時間経過とともに増加）および③自重による滑動力（一定）を算定する。①＋②＞③で安定と評価，安全率は①＋②を③で除して算出する。

横木に関しては，(7)式に示される，①横木の木材強度による曲げ抵抗モーメント（腐朽に伴い時間経過に伴い低減），②根系のせん断抵抗力による滑動荷重低減による横木に負荷する曲げモーメントの低減量（根系の成長に伴い時間経過とともに増加），③自重による滑動力

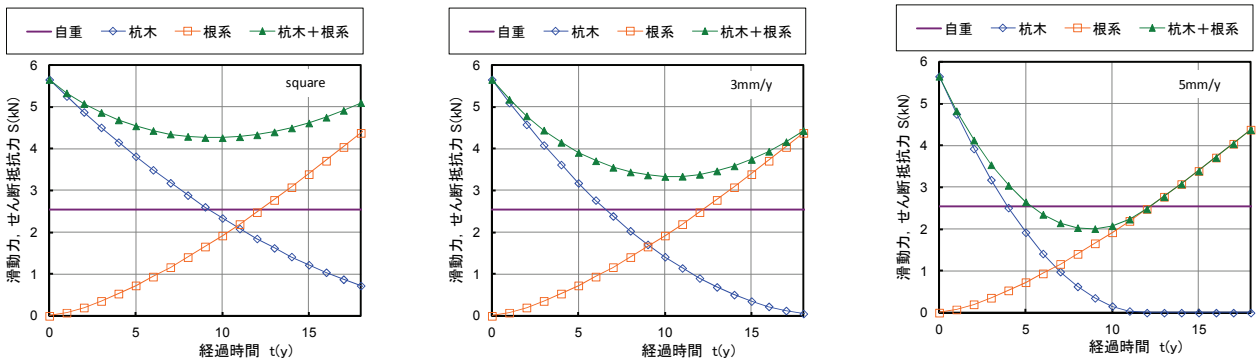
表－２　根系引き抜き試験結果

樹種	アラカシ					シラカシ			シラカシ						アラカシ				アラカシ					
樹高H(m)	2.4					3.5			7						7				6					
胸高直径(mm)	17					24			50						50				38					
根元直径(mm)	40					38			90						78				60					
根系本数(本)	5					3			6						4				6					
引抜き抵抗力(N)	960	931	441	451	941	519	235	1352	1646	274	1519	363	1049	843	59	88	20	176	69	333	294	108	108	29
直径1(mm)	18.5	11.7	16.6	9.0	13.0	12.3	8.9	14.9	14.0	7.2	22.4	11.4	10.4	14.8	1.1	2.3	1.4	3.8	5.9	6.8	6.3	2.8	2.2	1.7
直径2(mm)	24.3	12.5	20.9	9.9	13.4	12.9	9.2	16.5	17.1	7.6	22.7	13.5	11.9	14.8	1.1	2.3	1.4	3.8	5.9	8.6	6.3	2.8	2.2	1.7
平均直径(mm)	21.4	12.1	18.8	9.5	13.2	12.6	9.0	15.7	15.6	7.4	22.6	12.4	11.1	14.8	1.1	2.3	1.4	3.8	5.9	7.7	6.3	2.8	2.2	1.7

（一定）が横木にもたらす曲げモーメント，を算定する。①＋②＞③で安定と評価，安全率は①＋②を③で除して算出する。

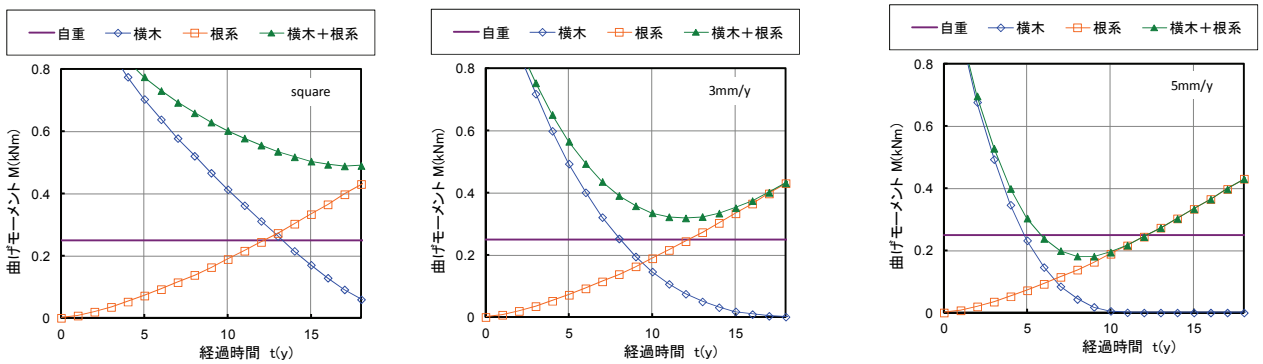
杭木のせん断力の変遷に関する計算結果を，上述の①杭木，②根系，③自重，①＋②を３種類の腐朽速度に関して**図－９**に示す。(a)の 2 次関数モデルとは**図－７**に示した経過時間に応じ腐朽速度が変化するモデル，(b)(c)はそれぞれ示す一定速度で腐朽が進むモデルである。また安全率に関しては計算した全ての腐朽速度に対して**図－11**，**図－12** に示す。

図－９ではいずれの腐朽速度においても時間の経過に伴い杭木のせん断抵抗力が低下し，根系によるせん断抵抗力が増加している。滑動に抵抗する①＋②は杭木の腐朽に伴い低下するが，根系成長により回復する。腐朽速度が大きいほど①＋②の低下は大きく，5mm/y の場合は５年目より自重の活動力を下回り不安定な状態となる。**図－11** に示す安全率は 2.2 から 0.8 程度の範囲で変化し，腐朽速度が大きいほど安全率の低下が大きい。本ケースでは 5mm/y で安全率 1 を下回り，4mm/y でかろうじて安全率 1 を確保している。



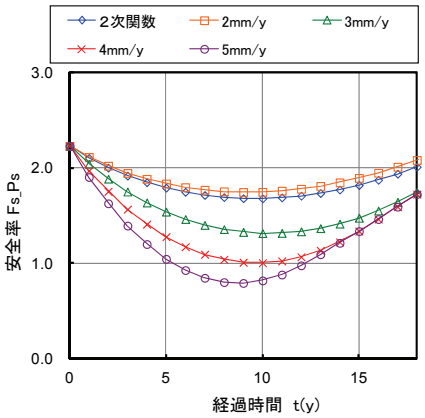
(a)2 次関数モデル　(b)腐朽速度 3mm/y　(c)腐朽速度 5mm/y

図－９　杭木のせん断力の変遷

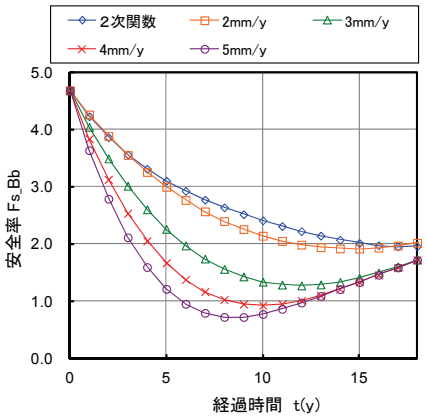


(a)2 次関数モデル　(b)腐朽速度 3mm/y　(c)腐朽速度 5mm/y

図－10　横木の曲げモーメントの変遷



図－11　せん断力安全率の変遷



図－12　曲げモーメント安全率の変遷

横木の曲げモーメントの変遷に関する計算結果を**図－10** に**図－９**と同様 3 種類の腐朽速度に関して示す。また安全率に関しては計算した全ての腐朽速度に対して**図－12** に示す。

図－10 ではいずれの腐朽速度においても時間の経過に伴い横木の曲げ抵抗モーメントが低下し，根系による曲げ抵抗モーメントが増加している。自重荷重の曲げモーメントに抵抗する①＋②は横木の腐朽に伴い低下するが，根系成長により回復する。腐朽速度が大きいほど①＋②の低下は大きく，5mm/y の場合は５年目より自重の活動力を下回り不安定な状態となる。**図－９**のせん断抵抗よりも曲げモーメントで腐朽速度の影響が大きい傾向がみられる。**図－12** に示す安全率は 4.6 から 0.8 程度の範囲で変化し，腐朽速度が大きいほど安全率の低下が大きい。安全率の値としてはせん断抵抗よりも変化の幅が大きくなっている。本ケースでは 4mm/y と 5mm/y で安全率 1 を下回り，2 次関数の場合は時間経過とともに低下するのみで一度低下して上昇する傾向は見られない。本計算では腐朽速度が 3mm/y 以下であればせん断力，曲げモーメントに関して，どの時点でも安定な状態が維持されることを示している。

7. おわりに

木材利用促進の観点から，丸太筋工によるのり面緑化工を対象事例として，木材特性の大きなデメリットである腐朽性を人工構造物が自然回帰するプロセスで利用し，木材の腐朽や樹木根系の成長という変遷する特性を構造物の性能評価に反映し，できるだけ実測されたデータに基づき定量的評価を試みた。この結果，木材の腐朽や樹木根系の成長によりのり面工の安定性が遷移するプロセスを定量的に示すことができ，木材腐朽速度が構造系の安定に与える影響を時間経過に沿って把握可能であることを提示した。ここで示した計算では，限られた調査やデータのためにいくつかの仮定や大胆なモデル化により評価を進めている点は否めない。評価の信頼性向上に向け，今後，腐朽速度データの充実，根系の形状･成長･強度データの充実が必要である。

本手法を適用することで，木材や植生効果を定量的に示し，木材利用や緑化が促進され，炭素吸収増大などによる環境保全に留意した社会資本の充実や温暖化対策効果が期待される。

謝辞：本調査の一部は 2008，2009 年度鹿島学術振興財団研究補助金の支援を受けて実施したものです。ここに記し，お礼申し上げます。

参　考　文　献

1）林野庁監修：平成 20 年度森林土木構造物施工マニュアル，pp. 18-19，2008.
2）吉野安里，柴田直明ほか：治山丸太筋工における木製構造物の経年変化，第 54 回日本木材学会研究発表要旨集，p. 409，2004.
3）吉野安里，柴田直明ほか：治山丸太筋工における木製構造物の経年変化（Ⅱ），第 55 回日本木材学会研究発表要旨集，p. 139，2005.
4）石川芳久：第 114 回生存圏シンポジウム要旨集，pp. 1-29，2008.
5）今井久，山口修一，池田穣，黒川潮：樹木ポット苗による緑化のり面の樹木根系調査，砂防学会研究発表会概要集，pp. 122-123, 2008.
6）北原曜：森林根系の崩壊防止機能，水利科学，No. 311, pp. 11-37, 2009.
7）今井久：樹木根系の斜面崩壊抑止効果に関する調査研究，ハザマ研究年報 pp. 34－51，2008.
8）池田穣，今井久，山口修一：ポット苗樹木による斜面緑化の経時変化－樹木の成長と二酸化炭素の固定－，第 17 回地球環境シンポジウム講演集，pp. 191－196，2009.

Stability Evaluation of Planted Slope Considering Nature of Timber Decaying and Tree Root Effect
－ Study on Tree Planted Slope with Horizontal Step Works Using Logs －

Hisashi IMAI, Yutaka IKEDA and Naoaki SHIBATA

Utilization of home-produced woods is required and indispensable for Japan, because wood utilization keeps forest sound and is an effective measure against global warming. To increase the wood utilization, good examples and clarifying the performance of utilization are desired. This report shows an example of using logs to support foundation soil for tree planting and presents the stability evaluation methodology of slope plantation system considering the log decay and tree root development process.